مهندسی متالورژی و مواد، ۳۳، ٤، ۱٤۰۱. (۲٦-۱۳)




مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/




# تاثیر عملیات حرارتی پیر سختی (T6) بر ریزساختار و خواص سایشی نانوکامپوزیت آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu تقویت شده با نانو صفحات گرافن*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور[۱]

DOI: 10.22067/jmme.2022.78198.1070

**چکیده** در این تحقیق، خواص سایشی و ریز ساختار نانوکامپوزیت آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cuتقویت شده با ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۷ و ۱ در صد نانو صفحات گرافن تولید شده به روش ریخته گری گردابی با کمک حباب زائی مافوق صوت بررسی شد. همچنین برای مطالعات ریزساختاری و سطوح سایش، میکروسکوپ الکترونی روبشی بکار گرفته شد. مطالعات ریزساختاری نانوکامپوزیت نشان داد که حضور نانو صفحات گرافن پراکنده باعث کاهش اندازه دانه شد ه، اما در درصدهای بالای این نانوذرات (۱ درصد وزنی)، کاهش محسوسی در اندازه دانه ایجاد نمی‌شود. همچنین حضور نانوذرات و کاهش اندازه دانه، افزایش چشمگیر مقاومت به سایش نانوکامپوزیت را به همراه دارند. البته در درصدهای بالای نانو صفحات گرافن (۱ درصد وزنی)، این نانو مواد در مرزدانه ها کلوخه ای شده و باعث کاهش مقاومت به سایش کامپوزیت شدند. نانوکامپوزیت تقویت شده با ۰٫۵٪ وزنی نانو صفحات گرافن قبل و بعد از عملیات حرارتی بهترین مقاومت به سایش را نشان داد که بهینه ترین درصد نانو صفحات گرافن می باشد.

**واژه‌های کلیدی** نانوکامپوزیت ریختگی، نانو صفحات گرافن، ریخته گری گردابی، فرآوری مافوق صوت.

# The Effect of Age Hardening Heat Treatment (T6) on the Microstructure and Wear Behavior of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu Nanocomposite Reinforced with Graphene Nano Plates

Mohammad Alipour

**Abstract** *In this study, microstructure and wear behavior of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy matrix nanocomposite reinforced with 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and 1 wt.% graphene nano plates (GNPs) produced by stir casting and ultrasonic treatment have been investigated. Ultrasound device equipped with a cooling system with high powers was used for mixing alloy and nanoparticles. Also the microstructure and wear surfaces of nanocomposite was investigated by scanning electron microscope equipped with EDS analysis. The microstructural studies of the nanocomposite revealed that GNPs addition reduces the grain size, but adding high GNPs content (1 wt.%) does not change the grain size considerably. Further investigations on wear revealed that the addition of GNPs increases wear resistance . At high GNPs contents (1 wt.%), the presence of GNPs agglomerate on grain boundaries was found that causes decrease the wear resistance. The optimum amount of nanoparticles is 0.5 wt.% GNPs that nanocomposite exhibits bes wear resistance.*

**Key Words** Casting nanocomposite, Graphene nano plates, Stir casting, Ultrasonic treatment.

* تاریخ دریافت مقاله۱٤۰۱/۵/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۹/۱۹ می‌باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

**Email**: alipourmo@tabrizu.ac.ir

## مقدمه

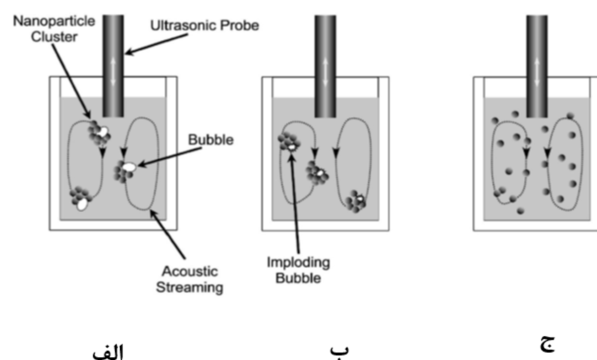
کامپوزیت های زمینه فلزی از جمله مهمترین انواع مواد پیشرفته می باشند که قدمتی بیش از ۵۰ سال دارند. این نوع کامپوزیت ها در صنایع زیادی همانند صنایع نظامی، حمل و نقل، هواپیماسازی و خطوط انتقال قدرت مورد استفاده می باشند [1-3]. از جمله کامپوزیت های زمینه فلزی، کامپوزیت های زمینه آلومینیمی هستند که به دلیل مزایایی از قبیل دانسیته پایین، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش عالی و مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب، امروزه در صنایع گوناگون از جمله صنایع هوافضا و خودرو دارای کاربرد گسترده ای هستند [3-6].

اضافه کردن عوامل تقویت کننده سرامیکی به آلیاژهای آلومینیوم موجب افزایش خواص مکانیکی و سایشی آنها می‌شود. عمده ذرات تقویت کننده که به آلیاژهای پودری آلومینیوم اضافه می شوند، کاربیدها، بوریدها، اکسیدها و نیتریدها می باشند. کاربید سیلیسیم با دمای ذوب بالا، چگالی پایین، استحکام بالا، سختی بالا، مقاومت به شوک حرارتی عالی، انبساط حرارتی پایین، هدایت حرارتی بالا و مدول الاستیک زیاد، یک تقویت کننده مناسب برای کاربردهای دمای بالا بشمار می رود [4-6].

کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپیوسته از راه های گوناگونی نظیر متالورژی پودر، تزریق مذاب در پیش ساخته، رسوب همزمان، آلیاژسازی مکانیکی و روش های گوناگون ریخته گری نظیر ریخته گری کوبشی، ریخته گری نیمه جامد، ریخته گری گردابی و دیگر روش ها تولید می شوند [3,7]. روش ریخته گری گردابی شامل هم زدن شدید فلز مذاب، تشکیل گرداب و وارد شدن ذرات تقویت کننده به داخل گرداب می باشد. پس از افزودن ذرات تقویت کننده به مذاب، دوغاب حاصله به مدت زمان معینی هم زده می شود، سپس با روش های متداول، ریخته گری انجام می گیرد [7].

لازم بذکر است که حضور ذرات تقویت کننده سخت در زمینه آلومینیم نرم همواره منجر به بهبود خواص نمی شود. حضور فیلم های اکسیدی و تخلخل در کامپوزیت های تهیه شده از روش ریخته گری گردابی به دلایل مختلف از جمله کشیده شدن هوا به داخل مذاب در حین هم زدن دوغاب کامپوزیتی و ممانعت از خروج گازها از دوغاب پس از ریخته گری به دلیل گرانروی بیشتر در مقایسه با آلیاژ زمینه، می تواند بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت های ریخته گری شده اثر معکوس داشته باشند. در مورد کامپوزیت های زمینه فلزی ذره‌ای، عموماً توزیع یکنواخت و مناسب بین زمینه و ذره، وجود تطابق شیمیایی و فیزیکی و نیز عدم وجود یا ناچیز بودن تخلخل و فیلم های اکسیدی سبب حصول خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب در محصول نهایی می‌شود [7].

در روش حباب سازی مافوق صوت، مخلوط مذاب–نانوذرات تحت تأثیر امواج مافوق صوت شدید قرار می گیرند. این عمل به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می شود. از جمله مهمترین اثرات این امواج که به اثرات غیرخطی معروفند، حباب زائی گذرا و جریان صوتی است [8,9]. جریان صوتی (که برای هم زدن بسیار با ارزش است)، حرکت مذاب در اثر شیب فشار صوتی است. حباب زائی در بر گیرنده تشکیل، بزرگ شدن و فروپاشی یا منفجر شدن حباب است. مطابق با شکل (۱) در ساخت نانوکامپوزیت ها به کمک امواج مافوق صوت، همزمان خوشه های نانوذرات موجود در مذاب توسط اثر حباب زائی امواج از بین می روند و توسط پدیده جریان صوتی به طور یکنواخت در داخل مذاب پراکنده می شوند [10].




شکل ۱ شماتیک تاثیر حباب زایی و جریان صوتی ناشی از امواج مافوق صوت برای پخش یکنواخت نانوذرات در داخل مذاب، (الف) کلوخه ای شدن نانو ذرات، (ب) جریان های گردابی و انفجار حباب‌ها، (ج) پخش یکنواخت نانو ذرات [10]

از آنجائی که هوا در حفرات موجود در خوشه های نانوذرات حبس شده است، بنابراین هوای حبس شده به عنوان جوانه ای برای تشکیل حباب ایفای نقش می کند. در مراحل اولیه افزودن نانوذرات به مذاب تعداد خوشه ها بسیار زیاد است، بنابراین تعداد حباب های تشکیل شده نیز زیاد خواهد بود. حباب های بوجود آمده در حین سیکل فشاری منفی رشد

می کنند و پس از بزرگ شدن تا اندازه مشخص در حین سیکل فشاری مثبت به طور ناگهانی از هم پاشیده می شوند. حباب‌های ریزی که در مدت زمانی کمتر از ۱۰-۶ ثانیه منفجر می شـــوند، نقاط گرم میکرونی گذرا را ایجاد می کنند. دما و فشار این نقاط به ترتیب °C ۵۰۰۰ و بالای ۱۰۰۰ اتمســفر اســت. هم چنین سرعت گرم شدن و سرد شدن این نقاط در حدود K/s ۱۰۱۰ است [9].

حباب های گذرا، ضربات انفجار گونه به خوشه ها و کلوخه‌های نانوذرات وارد می کنند و از این طریق خوشه های نانوذرات را می شکنند. ضربه شدید به همراه درجه حرارت‌های بسیار بالای گذرا سبب افزایش ترشوندگی ذرات توسط مذاب می شود. بررسی خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت ها نشان داده است که سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهائی نانوکامپوزیت ها نسبت به آلیاژ پایه به میزان چشمگیری بیشتر است [8]. بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت های فوق نشان داده است که اندازه دانه و بازوهای دندریتی فاز زمینه نانوکامپوزیت نسبت به آلیاژ مربوطه کوچک تر است. یکی از اثرات مهم حضور نانوذرات، حذف ترکیبات بین فلزی مضر گزارش شده است [9].

مطالب یاد شـــده از مهمترین عوامل برای برابر یا بهتر بودن انعطاف پذیری نانوکامپوزیت نسـبت به آلیاژ پایه محسـوب می شوند. توزیع و پراکندگی نانوذرات در زمینه نانوکامپوزیت نسبتاً مطلوب اســت و همواره تعدادی خوشــه و کلوخه نانوذرات در نواحی مجاور مرزدانه ها و یا در امتداد مرزدانه ها مشاهده شده است. علاوه بر این، گزارش شده است که نانوذرات مجزا بیشتر در درون دانه ها یا بازوهای دندریتی فاز زمینه پراکنده شــده اند [8].

در پژوهش حاضـــر روش جدیدی برای توزیع بهتر نانو صفحات گرافن و همچنین اصلاح بیشتر ریز ساختار بر مبنای فرآیند ذوبی به کمک فرآوری مافوق صوت در نظر گرفته شده است. بر این مبنا نانو صفحات گرافن (GNPs) بعد از آسیاب کاری پرانرژی و کامپوزیت شـــدن با پودر میکرونی آلومینیوم به مذاب اضافه شده و تحت فرآوری ریخته گری گردابی و مافوق صوت قرار می‌گیرند. سپس ریز ساختار زمینه و رفتار سایشی نانوکامپوزیت بررســی می‌شــود. به دلیل اهمیت آلیاژهای ســری ۷xxx در صنایع پیشرفته، آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu به عنوان آلیاژ زمینه در ساخت نانوکامپوزیت انتخاب شده است.

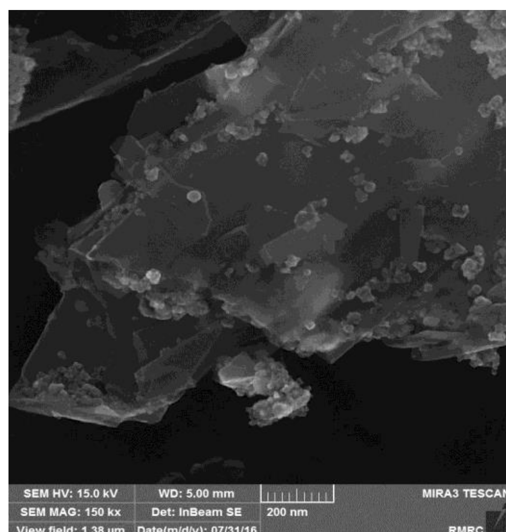
## روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu با ترکیب مشخص شده در جدول (۱) و نانو صفحات گرافن و پودرهای میکرونی آلومینیوم با ابعاد ٤٠ میکرومتر برای ساخت نانوکامپوزیت Al-8Zn-3Mg-2.5Cu -GNPs استفاده شد. از جمله ویژگی های نانو صفحات گرافن می توان به متوسط تعداد لایه بین ۵ تا ۱۰ لایه و خلوص بالای ۹۹ درصد وزنی اشاره کرد. در شکل (۲)، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو صفحات گرافن نشان داده شده است. در این تحقیق نانو صفحات گرافن در درصدهای وزنی ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۷ و ۱ درصد وزنی به مذاب آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu اضافه شدند تا حالت بهینه بدست آید.

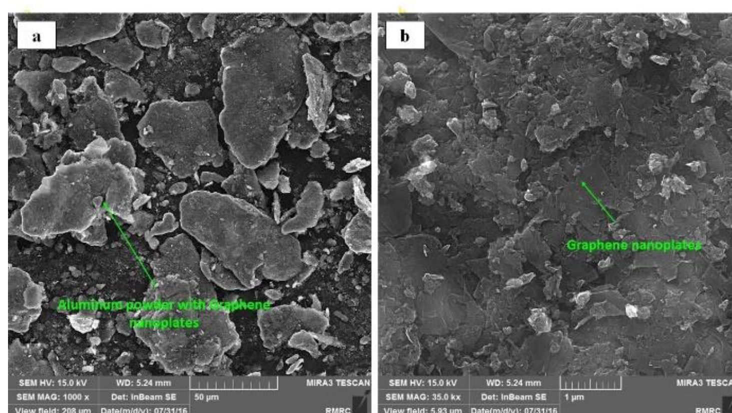
برای افزودن نانوذرات به مذاب از روش ساخت پودر کامپوزیتی با استفاده از آسیاب کاری پرانرژی مدل NARYA-MPM 2-250 H استفاده شد. در این روش ابتدا مخلوطی از نانو صفحات گرافن و پودر آلومینیومی با ابعاد ٤٠ میکرومتر در داخل آسیاب پرانرژی به مدت ۲ ساعت تحت عملیات آسیاب قرار گرفتند تا پودر کامپوزیتی آلومینیم با نانو صفحات گرافن حاوی ۲۵ درصد نانو صفحات گرافن و ۷۵ درصد پودر آلومینیوم بدست آید. سپس کامپوزیت پودری حاصل به مذاب افزوده شد. در شکل (۳)، تصویر پودر کامپوزیتی Al-25GNPs نشان داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu (درصد وزنی)

| element | Al | Zn | Mg | Cu | Ti | Zr | Fe | Si | Mn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | تعادل | ۸ | ۳ | ۲٫۵ | ۰٫۱۰ | ۰٫۱۵ | ۰٫۱ | ۰٫۱۲ | ۰٫۱ |




شکل ۲ تصویر FESEM از نانو صفحات گرافن

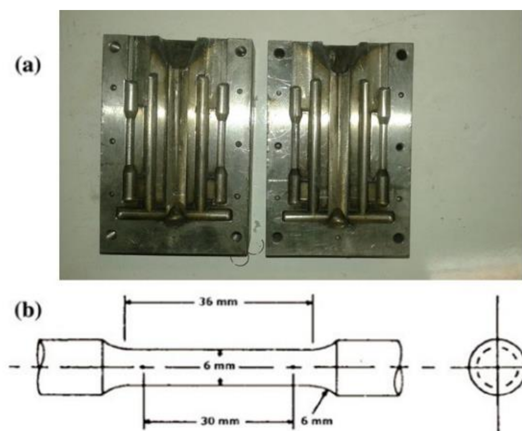



شکل ۳ تصویر پودر کامپوزیتی Al-25 Graphene بعد از ۲ ساعت آسیاب کاری پرانرژی، (الف) بزرگنمایی پایین پودر آلومینیوم، (ب) بزرگنمایی بالا از گرافن روی پودر آلومینیوم

برای ساخت نمونه های مختلف ابتدا مقدار منا سب از آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu در داخل بوته گرافیتی قرار داده شد. مجموعه مذکور در داخل یک کوره مقاومتی با دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. پس از ذوب کامل آلیاژ و پس از فرو بردن همزن در مذاب، عمل هم زدن و افزودن نانو پودر کامپوزیتی به مذاب صورت گرفت. سرعت همزن ۵۰۰ دور بر دقیقه تنظیم گردید و مدت زمان اعمال همزن مکانیکی ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از پایان پذیرفتن عمل هم زدن، بوته از کوره خارج شده و بعد از کنار زدن لایه سرباره، مذاب به مدت ۳۰ ثانیه تحت عملیات مافوق صوت با توان ۲۰۰۰ وات قرار گرفت. سپس مذاب حاصل در داخل قالب فلزی (شکل ٤) ریخته شد. از قسمت وسط نمونه های حاصل از این قالب، نمونه های استوانه ای به ارتفاع ۱ سانتی متر با قطر ۱ سانتی متر تهیه گردید. سطح این نمونه ها ابتدا با کاغذ سمباده های ضدآب ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ تحت عمل سمباده زنی قرار گرفت. سپس سطح نمونه ها پولیش شد و در محلول یک درصد حجمی اسید هیدروفلوئوریک در آب برای مدت ۳۰ ثانیه اچ گردید.

ریزساختار نمونه های مذکور ابتدا با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM و FESEM) با مدل VEGA\\TESCAN-LM مجهز به آشکارساز EDX در بزرگنمائی های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی از این بررسی، پی بردن به نقش نانو صفحات گرافن بر اندازه و شکل بازوهای دندریتی، فاز یوتکتیک، نحوه توزیع نانو صفحات در زمینه نانوکامپوزیت، ریزساختار نمونه های مختلف و دیگر

فازهای موجود در ریزساختار آلیاژ مورد نظر بود. برای ارزیابی رفتار سایشی نیز از آزمون سایش پین بر روی دیسک استفاده شد.




شکل ٤ (الف) قالب ریخته گری، (ب) ابعاد نمونه تست کشش

## نتایج و بحث

### مطالعات ریزساختاری آلیاژ پایه و پودرنانوکامپوزیتی

نکته مهمی که باید بدان اشاره شود اندازه و شکل پودرهای میکرونی آلومینیوم می باشد. اندازه اولیه این پودرها ٤٠ میکرون می باشد. اما بعد از ۲ ساعت آسیاب کاری پرانرژی، اندازه و شکل پودرها تغییر می کند و بخاطر عملیات انجام شده شکل پودرهای میکرونی از کروی بصورت صفحه ای در آمده است و اندازه آنها نیز کاهش پیدا کرده است. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است بعد از اضافه کردن نانو صفحات گرافن به پودرهای میکرونی و بعد از عملیات آسیاب کاری پرانرژی، نانو صفحات گرافن بصورت یکنواخت در داخل پودر های آلومینیومی پخش شده اند.

### توزیع نانوذرات در نانوکامپوزیت ریختگی

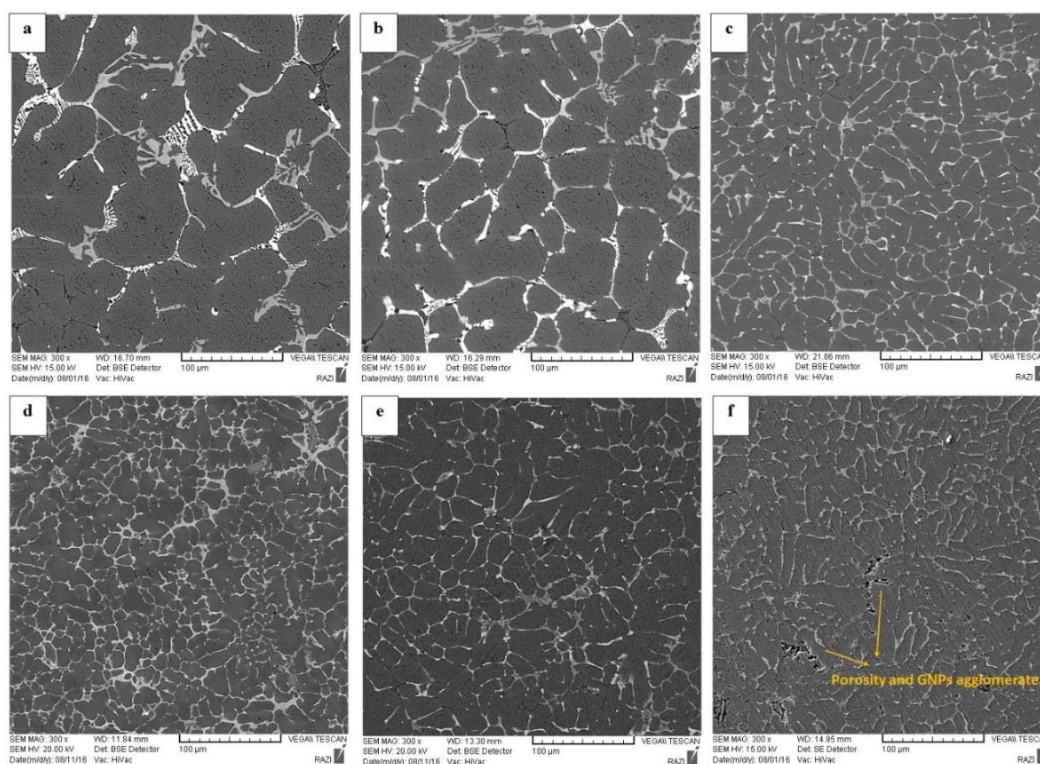
آنچه که مسلم است توزیع نانو صفحات گرافن در زمینه تحت تأثیر اتفاقاتی که در مذاب در حین پراکنده ساختن نانو صفحات گرافن و قبل از ریخته گری رخ می دهد و پدیده هایی که در حین انجماد رخ می دهد، می باشد. در خصوص مورد اول می توان به ته نشین شدن، شناور شدن و حتی کلوخه ای شدن اشاره کرد. در خصوص مورد دوم، مهمترین مسأله، میان کنش بین جبهه انجماد و نانو صفحات گرافن است که به فاکتورهای بسیاری وابسته است که از جمله آنها می توان به شکل جبهه انجماد، سرعت انجماد، کسر حجمی نانو صفحات گرافن، گرادیان دمایی و گرادیان غلظت عناصر آلیاژی در جلوی جبهه انجماد اشاره داشت [11].

آنچه بدیهی است این است که اگر نانوذرات در مذاب از پراکندگی مناسبی برخوردار نباشند، نمی توان انتظار داشت که توزیع نانوذرات در نمونه حاصل شده از انجماد این مذاب مطلوب باشد. علت این که با افزودن نانو صفحات گرافن به صورت پودر کامپوزیتی می توان به ساخت نانوکامپوزیت دست یافت را اینگونه می توان بیان کرد که در تهیه پودر کامپوزیتی از روش آسیاکاری پرانرژی استفاده شده است، بنابراین در اثر نیروهای ضربه ای و برشی شدید ناشی از گلوله های آسیاب، خوشه های نانوذرات از بین رفته و نانو صفحات گرافن به صورت مجزا در زمینه پودر آلومینیوم توزیع خواهند شد (شکل ۳). توزیع یکنواخت نانو صفحات گرافن در زمینه پودر آلومینیوم سبب افزایش فاصله بین نانو صفحات گرافن و در نتیجه کاهش نیروی جاذبه بین آنها خواهد شد. این موضوع احتمال غلبه نیروی فراهم شده توسط همزن مکانیکی بر نیروی جاذبه بین نانو صفحات گرافن را افزایش داده و در نتیجه مانع از تشکیل خوشه های نانو صفحات گرافن در هنگام افزودن پودر کامپوزیتی به مذاب و پس از ذوب شدن ذرات پودری می‌شود.

کاملاً مشخص است که هر چه اندازه ذرات در داخل مذاب کوچکتر باشد به نسبت ذرات کلوخه ای شده بزرگتر، راحت تر در داخل مذاب حل می شوند. پخش شدن نانو ذرات در داخل مذاب توسط دو پدیده مهم اتفاق می افتد. در هنگام تزریق پودرهای کامپوزیتی آلومینیوم- نانو صفحات گرافن به داخل مذاب، انحلال و ذوب شدن پودرهای میکرونی آلومینیوم اتفاق می افتد، در این هنگام چون نانو صفحات گرافن در داخل پودر های آلومینیوم با عملیات آسیاب کاری پرانرژی قرار گرفته‌اند. هنگامی که پودر های میکرونی آلومینیوم در داخل مذاب حل و ذوب شدند، نانو صفحات گرافن در داخل زمینه آلومینیوم مذاب رها سازی می شوند. این رها سازی نانو صفحات گرافن در مدت همزدن مکانیکی مذاب اتفاق می افتد. در ادامه با اعمال امواج مافوق صوت به نانوکامپوزیت تا مرحله ریختن در قالب، کلوخه های نانو صفحات گرافن کاملا از هم باز شده و نانو صفحات در داخل زمینه پخش شدگی یکنواختی بدست می آورند.

ریزساختار آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu بعد از اضافه

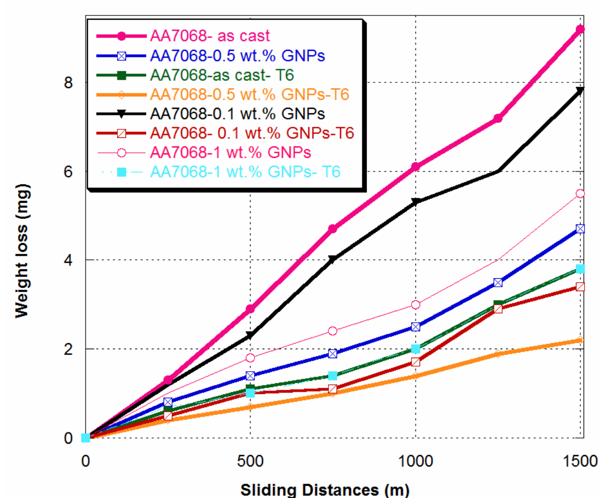
کردن درصدهای وزنی ۰،۱، ۰،۳، ۰،۵، ۰،۷ و ۱ گرافن در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، با افزودن نانو صفحات گرافن، تغییرات ساختاری در داخل زمینه اتفاق افتاده و شاخه‌های دندریتی در اثر افزودن نانوذرات و همچنین بخاطر اعمال امواج آلتراسونیک (شکل ۵– الف) شکسته شده و شکل نهایی ریزساختار به جای ساختار دندریتی با شاخه های کشیده به ساختاری با دانه هایی به شکل گل رز (شکل ۵–د) در آمده اند. در ضمن با افزودن نانو صفحات گرافن ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در مرزدانه ها که درشت و ضخیم بود، بصورت یکنواخت در داخل زمینه پخش شده اند. دلیل این امر می تواند مربوط به نانوذرات و امواج آلتراسونیک باشد. نانوذرات در حین انجماد محل های جوانه زنی بوده و باعث پخش شدن ترکیبات در داخل زمینه می شوند و در نهایت باعث ریزدانگی نانوکامپوزیت خواهند شد. امواج آلتراسونیک هم با شکستن دندریت ها و فازهای ثانویه تشکیل شده باعث ریز شدن و پخش شدن فازهای ثانویه در داخل زمینه نانوکامپوزیت خواهند شد. در کل ریزساختار حاصل از اضافه کردن نانو صفحات گرافن تا ۰،۵ درصد وزنی بهتر شده و دانه ها ریزتر شده اند و با ریزتر شدن دانه ها خواص استحکامی بهتر شده است، اما در درصدهای بیشتر، نانو ذرات کلوخه ای شده و باعث کاهش خواص استحکامی می شود. اما در رابطه با توزیع یکنواخت نانو صفحات در داخل زمینه نیز می توان گفت که این ذرات با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک ها و تغییر مسیر آنها (crack deflection) در داخل زمینه هنگام اشاعه ترک باعث افزایش استحکام و چقرمگی نانو کامپوزیت خواهند شد. بنابراین دو مکانیزم و پدیده مهم در داخل نانوکامپوزیت اتفاق می افتد. اول این که با اضافه کردن نانو ذرات، اندازه دانه های آلیاژ زمینه کاهش پیدا خواهد کرد که بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت را به همراه خواهد داشت. دوم این که با افزودن نانو ذرات و پخش یکنواخت این ذرات در داخل زمینه با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک و تغییر مسیر ترک در داخل زمینه، باعث افزایش استحکام و چقرمگی نانوکامپوزیت خواهند شد. اما در درصدهای بالاتر نانو صفحات گرافن (بیشتر از ۰،۵ درصد) چون مقدار آن زیاد می باشد، نانو صفحات، خوب در زمینه توزیع نشده و کلوخه خواهند شد و بیشتر در مرزدانه ها تجمع خواهند کرد که این کلوخه‌ای شدن نانو صفحات گرافن باعث کاهش خواص استحکامی نانو کامپوزیت خواهد شد.




**شکل ۵–** تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ با الف– صفر درصد گرافن ب– ۰،۱ درصد گرافن، ج– ۰،۳ درصد گرافن، د– ۰،۵ درصد گرافن، ه– ۰،۷ درصد گرافن، و– ۱ درصد گرافن

## بررسی رفتار سایش

***بررسی نرخ سایش نانوکامپوزیت‌های Al-8Zn-3Mg-2.5Cu /GNPs .*** نرخ سایش بیانگر حجم از دست رفته ماده به وسیله سایش (به میلیمتر مکعب) به ازای واحد مسافت لغزشی (به متر) است. اندازه گیری سایش به وسیله این کمیت برای مقایسه نرخ سایش در دسته‌های مختلف مواد بسیار مفید است [12]. برای محاسبه نرخ سایش در نمونه‌های مختلف، میزان کاهش وزن در نمونه‌های نانوکامپوزیت از اهمیت بسزایی برخوردار است. در شکل (٦)، کاهش وزن نمونه‌های نانوکامپوزیت با درصدهای مختلف فاز تقویت‌کننده، قبل و بعد از عملیات حرارتی به ازای اعمال نیروی ۲۰ نیوتن نشان داده شده است.




شکل ٦ میزان کاهش وزن نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی درصدهای مختلف نانو صفحات گرافن قبل و بعد از اعمال عملیات T6 تحت نیروی ۲۰ نیوتن

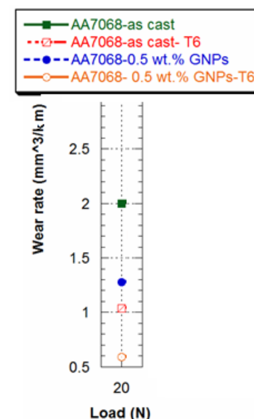
در شکل (۷)، نرخ سایش نمونه‌های نانوکامپوزیت با فاز تقویت‌کننده گرافن برحسب نیروی اعمالی ۲۰ نیوتن نشان داده شده است. نرخ سایش برای نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با ۰/۵ درصد وزنی نانو صفحات گرافن بعد از عملیات حرارتی T6 در ۲۰ نیوتن نسبت به آلیاژ پایه ۳/۳ برابر کاهش نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از اضافه کردن نانوذرات و تاثیر آنها بر روی اندازه دانه، کاهش اندازه دانه باعث کاهش نرخ سایش نسبت به نمونه آلیاژ پایه شده است. علت افزایش مقاومت به سایش با کاهش اندازه دانه، افزایش سختی نمونه‌ها می‌باشد. بررسی تأثیر ریز شدن دانه‌های زمینه بر سختی آنها نشان داد که با کاهش اندازه دانه‌ها، سختی نانوکامپوزیت افزایش یافته و این افزایش سختی از رابطه تجربی هال–پچ تبعیت می‌کند. افزایش سختی، مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک را به‌همراه دارد و براساس رابطه آرچارد موجب کاهش نرخ سایش می شود. با ترکیب دو رابطه آرچارد و هال–پچ (رابطه ۱) نرخ سایش براساس اندازه دانه برابر است با:

$$W=KP/H \quad (1)$$

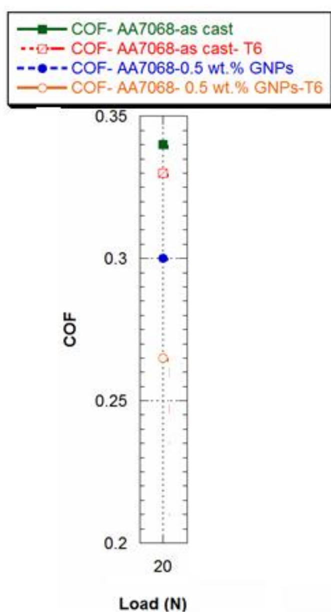
در این رابطه، W، نرخ سایش ($mm^3/km$)، P، نیروی اعمالی (N)، H، سختی (برینل) و K، ضریب ثابت می‌باشند. باتوجه به رابطه (۱) با کاهش اندازه دانه‌ها، چگالی مرزها که به عنوان موانع در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کنند، افزایش یافته و سختی و مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. محققین دیگر نتایج مشابهی از اثر اندازه دانه بر سایش بدست آورده اند [13-15]. پراسادا و همکارانش [14] تحقیقی بر روی اثر اندازه دانه بر رفتار سایش فلز آلومینیم و آلیاژ Al-7Si انجام دادند. نتایج نشان داد که با کاهش اندازه دانه در این ترکیبات، در شرایط سایش خشک و بار اعمالی ۵۰ نیوتن، مسافت سایش، ۱۸۰۰ متر و سرعت سایش، 1 m/s، نرخ سایش کاهش می‌یابد.

گوان و همکارانش [15] نشان دادند که با نانوساختار کردن سطح آلومینیم خالص، سختی و مقاومت به سایش افزایش چ‌شمگیری یافته ا ست. در تحقیق حا ضر با توجه به شکل (۷) افزودن در صد حجمی نانو صفحات گرافن در نمونه کامپوزیتی آلومینیم موجب کاهش نرخ سایش نسبت به نمونه پایه شده ا ست. مقاومت به سایش با افزایش در صد نانو صفحات گرافن افزایش یافته است. علیزاده و همکارش [13] گزارش کردند که ایجاد ساختار نانو و ا ستفاده از نانوذرات B4C مقاومت سایشی آلیاژهای آلومینیم را بهبود می بخشد. این محققین ورقه ای شدن را به عنوان مکانیزم اصلی سایش نانوکامپوزیت Al/ B4C معرفی کردند. شفیعی زرقانی و همکارانش [16] نشان دادند بعد از چهار پاس فرآیند همزن اصطکاکی و ایجاد نانوکامپوزیت‌های $Al/Al_2O_3$، سختی و مقاومت به سایش به علت حضور ذرات سخت نانو $Al_2O_3$ و ریز شدن دانه‌ها افزایش یافت. تأثیر هم‌زمان کاهش اندازه دانه و حضور ذرات نانومتری سرامیک بر افزایش سختی و مقاومت به سایش توسط دیگر محققین نیز گزارش شده ا ست [17-19]. چسبیدن مناطق صاف به یکدیگر در سطوح لغزش (سطح واقعی تماس)، شخم زده شدن سطوح به وسیله ذرات سایشی و دندانه‌های سخت، تغییر فرم زبری‌های سطحی، میزان تغییر شکل پلاستیک، جدایش عناصر به سطح و وجود فیلم‌های سطحی از عواملی هستند که روی ضریب

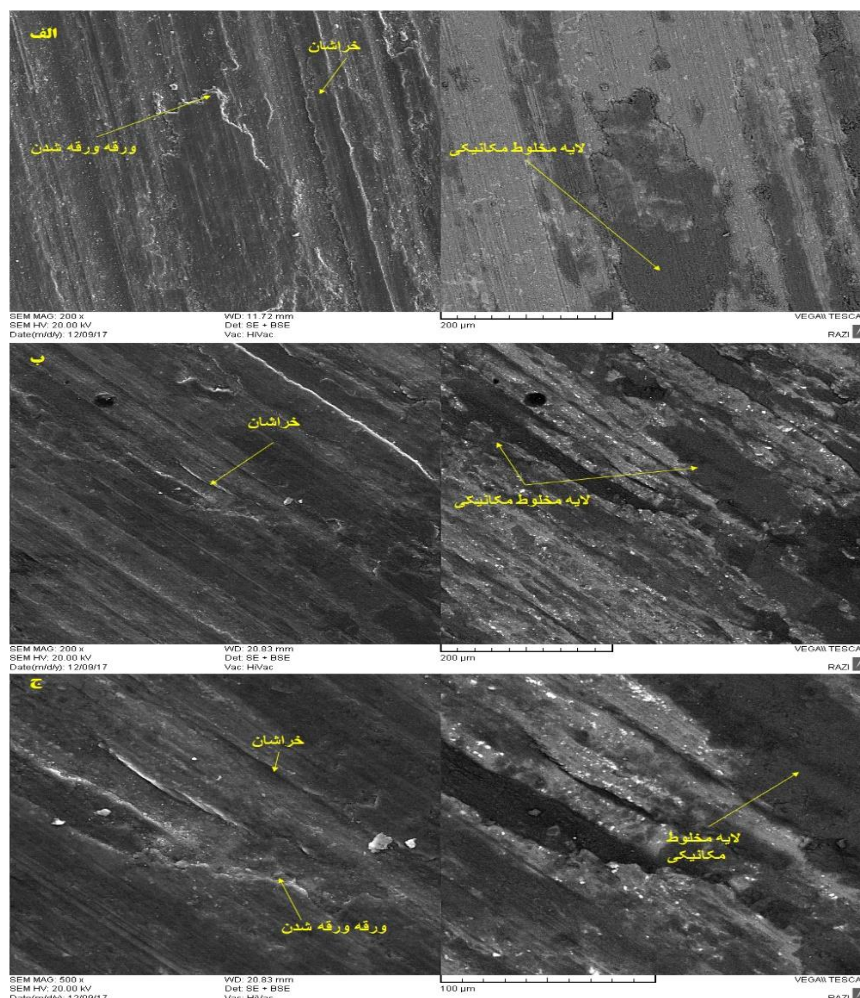
اصطکاک تأثیر می‌گذارند [13,20,21] تغییرات ضریب اصطکاک برای نانوکامپوزیت‌های با فاز تقویت‌کننده نانو صــفحات گرافن در شکل (۸) نشان داده شده است.



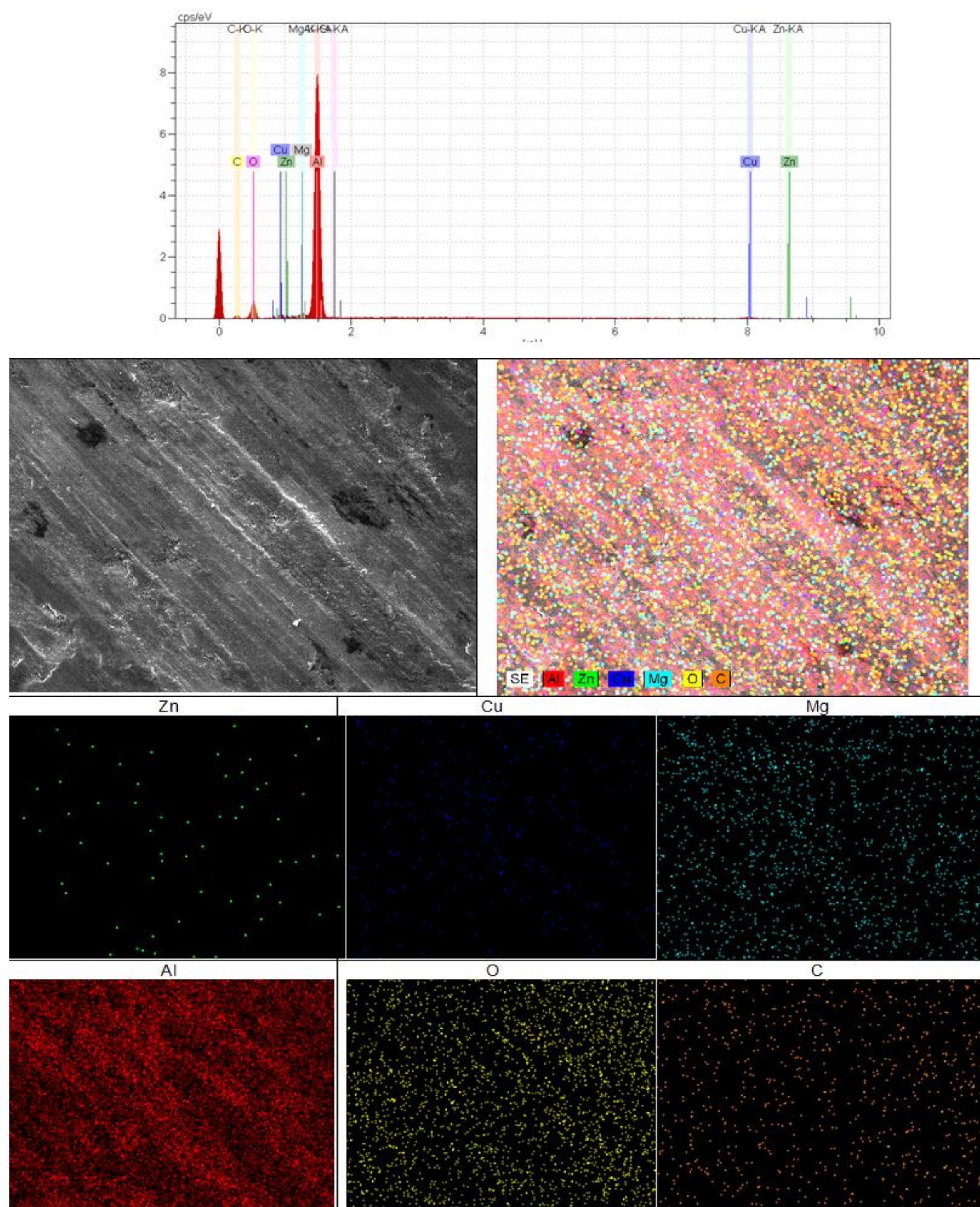

شکل ۷ نرخ سایش آلیاژ پایه و نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن قبل و بعد از عملیات T6




شکل ۸ ضریب اصطکاک آلیاژ پایه و نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن قبل و بعد از عملیات T6




شکل ۹ تصاویر SEM از سطوح سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با ۰/۵ درصد وزنی نانو صفحات گرافن تحت نیروی ۲۰ نیوتن، الف) قبل از عملیات حرارتی T6، ب و پ) بعد از عملیات حرارتی T6




شکل ۱۰ تصویر SEM و آنالیز EDS از سطوح سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با ۰/۵ درصد وزنی نانو صفحات گرافن تحت نیروی ۲۰ نیوتن بعد از عملیات حرارتی T6

***سطوح سایش.*** بررسی سطوح سایش اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با مکانیزم‌های سایش ارائه می‌دهد. تصاویر SEM از سطوح سایش یافته برای نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو صفحات گرافن در شکل (۹) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۰) آنالیز عنصری از سطح سطوح سایش و نحوه پخش عناصر تشکیل دهنده و ترکیبات آورده شده است. بر طبق مکانیزم سایش خراشان، نانوذرات تقویت کننده سختی و مقاومت به سایش بیشتری نسبت به زمینه نرم آلومینیم دارند.

طی فرآیند سایش، زمینه به سرعت ساییده شده و در نتیجه نانوذرات تقویت کننده از سطح نمونه جلو زده می‌شوند. سپس، نانو صفحات گرافن کل نیروی سایش وارده را باید تحمل کنند. در نتیجه مقاومت به سایش نمونه‌های تقویت شده با نانوذرات نسبت به آلیاژ پایه بهبود می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس خصوصیات نانوذرات تقویت کننده و زمینه متصل به آن، خواص سایشی تغییر می‌کند.

## نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش ساخت و بررسی ریزساختار و خواص سایشی نانوکامپوزیت Al-8Zn-3Mg-.5Cu/GNPs تولید شده به روش ریخته گری گردابی با کمک امواج مافوق صوت می باشد که نتایج حاصل به شرح زیر می باشد.

۱. در اثر اعمال فرآوری مافوق صوت بر مذاب در ناحیه هایی از مذاب بر اثر افزایش فشار موضعی، جوانه های جامدی ایجاد می شود. این جوانه ها باعث ایجاد ساختاری بسیار ریزتر در زمینه پس از انجماد می شوند که طبق رابطه هال–پچ باعث افزایش خواص استحکامی زمینه می گردد.

۲. فرآوری مافوق صوت باعث شکسته شدن و پراکندگی دندریت ها و رسوبات در داخل فاز زمینه می شود که از این طریق نیز افزایش خواص استحکامی را به همراه دارد.

۳. ا ستفاده فرآوری آ سیاب کاری پرانرژی و تولید تقویت کننده به صورت کامپوزیتی، باعث توزیع و پخش یکنواخت تر در زمینه آلیاژ می شود.

٤. وجود فاز تقویت کننده گرافن در زمینه فلزی با مکانیزم های اوراوان، هال پچ و انتقال بار باعث افزایش استحکام نانوکامپوزیت می شود.

۵. نتایج آزمون سایش نشان داد که با کاهش اندازه دانه، نرخ سایش و ضریب اصطکاک کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد نانو صفحات گرافن نرخ سایش و ضریب اصطکاک در نمونه های نانوکامپوزیت کاهش می‌یابد. با افزایش نانو صفحات گرافن تا ۰/۵ درصد وزنی، به علت خاصیت خودروانکاری گرافن در حین سایش، مقاومت به سایش افزایش پیدا میکند. اما با افزایش نانو صفحات گرافن تا ۱ درصد وزنی به علت کلوخه ای شدن نانو صفحات گرافن، ایجاد تمرکز تنش و تضعیف فصل مشترک نانو صفحات گرافن و زمینه، نرخ سایش بیشتر شده و مقاومت به سایش کاهش می‌یابد.

## مراجع


[1] S. Rawal, "Metal-matrix composites for Space Applications", *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 53, pp 14-17, (2001).

[2] X. Li, Y. Yang, X. Chen," Ultrasonic-Assisted Fabrication of Metal Matrix Nanocomposites", *Journal of Materials Science*, vol. 39, pp 3211-3212, (2004).

[3] X. Yibin, T. Yoshita, “Thermal Conductivity of SiC Fine Particles Reinforced Al Alloy Matrix Composite With Dispersed Particle Size", *Journal of Applied Physics*, vol. 95, pp 722-726, (2004).

[4] C. Borgonovo, D. Apelian, "Manufacture of Aluminum Nanocomposites: A Critical Review", *Materials Science Forum*, vol. 678, pp 1-22, (2011).

[5] Y. Yang, X. Li, J. Lan, " Study on Bulk Aluminum Matrix Nano-Composite Fabricated by Ultrasonic Dispersion of Nano-Sized SiC Particles in Molten Aluminum Alloy", *Materials Science and Engineering A*, vol. 380, pp 378-383, (2004).

[6] D. Miracle,"Metal matrix composites–from science to technological significance", *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp 2526-2540, (2005).

[7] L. Wenzhen, L. Shiying, Z. Qiongyuan, Z. Xue,"Ultrasonic-Assisted Fabrication of SiC Nanoparticles Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Materials Science Forum*, vol. 654-656, pp 990-993, (2010).

[8] J.Y. Hihn, M.L. Doche, A. Mandroyan, L. Hallez and B.G. Pollet, "Respective Contribution of Cavitation and Convective Flow to Local Stirring in Sonoreactors", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 18, p. 881-887, (2011).

[9] Y. Chen, S. Tekumalla, Y.B. Guo, R. Shabadi, M. Gupta, “The dynamic compressive response of a high-strength magnesium alloy and its nanocomposite", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 702, , pp. 65-72, (2017).

[10] Santanu Sardar, Santanu Kumar Karmakar, Debdulal Das, "Ultrasonic Assisted Fabrication of Magnesium Matrix Composites: AReview", *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, Issue 2, Part A, pp. 3280-3289, (2017).

[11] Deborah D. L. Chung, " Metal-Matrix Composites", Carbon Composites (Second Edition), pp. 532-562, (2017).

[12] G.E. Dieter, *"Mechanical Metallurgy"* ,Third Edition , McGraw-Hill , (1976).

[12] L.M. Hutchings, Tribology: Friction and wear of engineering materials: Edward Arnold, (1992).

[13] A. Alizadeh, "Mechanical properties and wear behavior of Al–2 wt.% Cu alloy composites reinforced by $B_4C$ nanoparticles and fabricated by mechanical milling and hot extrusion Materials characterization", vol. 67, pp.119–128, (2012).

[14] A.K. Prasada Rao, Karabi Das, B.S. Murty, M. Chakraborty, Effect of grain refinement on wear properties of Al and Al–7Si alloy, Wear, vol. 257, pp. 148-153.( 2004).

[15] X.S. Guan, Z.F. Dong and D.Y. Li, "Surface nanocrystallization by sandblasting and annealing for improved mechanical and tribological properties", *Nanotechnology*, vol. 16, pp. 2963-2971.( 2005).

[16] A. Shafiei-Zarghani, S.F. Kashani-Bozorg, A. Zarei- Hanzaki, "Wear assessment of Al/$Al_2O_3$ nano-composite surface layer produced using friction stir processing", *Wear*, vol. 270, pp. 403-412.( 2011).

[17] T. Ma, H. Yamaura, D.A. Koss, R.C. Voigt, Dry sliding wear behaviour of cast SiC reinforced Al MMCs, Mater. Sci. Eng. A. vol. 360, pp. 116–125.( 2003).

[18] D. Poirier, R.A.L. Drew, M.L. Trudeau, R. Gauvin, "Fabrication and properties of mechanically milled alumina/aluminum nanocomposites", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, pp. 7605-7614, ( 2010).

[19] A.H. Yaghtin, E. Salahinejad, A. Khosravifard, "Processing of nanostructured metallic matrix composites by a modified accumulative roll bonding method with structural and mechanical considerations", *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 19, pp. 951-956.( 2012).

[20] A. Zolriasatein, R.A. Khosroshahi, M. Emamy, N. Nematie, "Mechanical and wear properties of Al-$Al_3Mg_2$ nanocomposites prepared by mechanical milling and hot pressing", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, pp. 290-297.( 2013).

[21] M. Walczak, D. Pieniak, M. Zwierzchowski, "The tribological characteristics of SiC particle reinforced aluminium composites", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 15, pp. 116-123.( 2015).